

## 既約分解表現に基づく学習制御系および予測制御系の設計に関する研究

著者	長縄 明大
号	1646
発行年	1994
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/6919">http://hdl.handle.net/10097/6919</a>

氏 名	なが 縄 明 大
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	既約分解表現に基づく学習制御系および予測制御系の 設計に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 猪岡 光
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 猪岡 光    東北大学教授 箱守京次郎 東北大学教授 林   叡    東北大学助教授 石原   正

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

制御系設計では, 制御対象の数学モデルを作成し, これをもとにコントローラの設計を行う。しかし, 作成したモデルは, 制御対象の特性を正確に表現していない (モデル化誤差を有する) ため, 実際の制御系では良好な制御性能が得られない場合がある。そこで, 近年, モデル化誤差が存在する場合にも良好な制御性能が保てるような制御系設計法として, ロバスト制御法が研究されている。このロバスト制御法の基礎理論として, 伝達関数を安定有理関数の比として表す既約分解表現がある。この既約分解を用いると, 制御対象を安定化する全てのコントローラのクラスを簡潔に表現することができる (Youla パラメトリゼーション)。さらに, このパラメトリゼーションでは, フリーパラメータが安定ならば制御系は安定となり, 感度関数や相補感度関数などの閉ループ系の伝達関数がフリーパラメータの 1 次式で表されるため, 制御系設計の数学的な取り扱いが容易になる。既約分解表現は,  $H_\infty$  制御や数値的最適化手法を用いるロバスト制御系設計法のみならずあるクラスの適応制御などにも利用されている。

一方, 近年, 学習制御法や予測制御法などの新しい制御方式が注目されている。これらの制御方式に対しても, 既約分解表現を用いることにより, より見通しの良い設計法が確立できるものと考えられ, 本論文では, 既約分解表現に基づく学習制御系および予測制御系の設計法を提案する。

## 第2章 既約分解表現に基づく学習制御系の設計

学習制御法は、ロボット産業を中心に広く使われており、1 試行前の制御対象の出力とこれを追従させたい目標軌道との偏差をメモリに記憶し、これを次回の操作量の決定に用いる有限区間制御である。しかし、制御対象に加わる外乱が存在する場合には、その影響が出力に直接現れてしまい問題となる。また、制御対象に不安定零点がある場合には、高周波域で学習は不安定となるため、学習制御アルゴリズムに低域通過フィルタを挿入し安定化する必要がある。しかし、フィルタのカットオフ周波数が低すぎると目標軌道追従性が悪くなり、高すぎると学習制御は不安定となる。さらに、試行の途中で目標軌道と出力の偏差が過大となる場合がある。これらの問題は、学習制御が開ループ制御系における逆特性を有する前置補償器を設計することと等価であることに起因している。

そこで、本章では、既約分解表現に基づく閉ループ構成の新しい学習制御法を提案する。本手法では、まず、基準コントローラとして  $LQG$  コントローラを設計し、これに基づく Youla パラメトリゼーションを構成する。次に、 $LQG$  コントローラによって得られる目標軌道追従性能をさらに向上するために、パラメトリゼーションのフリーパラメータを従来の学習制御アルゴリズムにより調整する。本手法の特徴は、調整パラメータをリセットしても制御系の安定性が失われないこと、制御対象に加わる外乱の影響を抑制することができることなどを上げることができる。シミュレーションでは、ステップ外乱（試行の4回目以降に高さ $-0.3$ 、試行の10回目以降に高さ $0.3$ ）が混入した場合を考え、従来法との比較を通して本手法の有効性を示した（図1及び図2参照）。

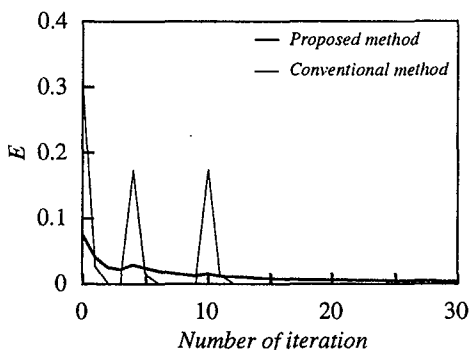


図1 学習の収束の様子

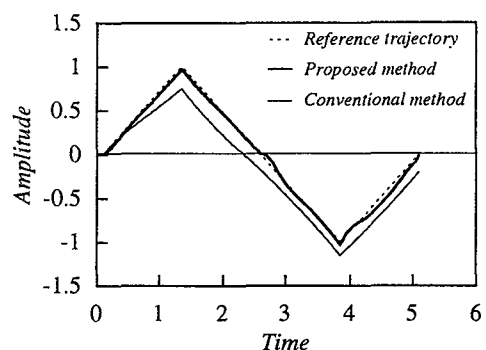


図2 試行の4回目の出力の比較

## 第3章 既約分解表現に基づくモデル予測制御系の設計

予測制御法は、プロセス制御の分野で注目されており、制御対象の出力の未来値を予測して操作量を決定する制御則である。この操作量を決定する方法は2通りあり、第3章では評価関数を用いず操作量を決定するモデル予測制御法について、第4章では評価関数を用いて操作量を決定する一般化予測制御法について考える。

モデル予測制御法とは、現在から未来のある時点までの有限時間で、制御対象の出力を現在の出力より予測した目標軌道に追従させながら、ある設定値に到達させるための操作量を求める制御則である。出力の予測は、制御対象のモデルを使用して行われる。しかし、この手法では、制御系の

安定性は、一般的には保証されていない。さらに、制御対象に加わる外乱やモデル化誤差が存在する場合には、制御系のロバスト性が問題となる。このため、近年、多くの研究者によって報告がなされているが、いまだ確立された方法はない。

そこで、本章では、既約分解表現に基づく新しいモデル予測制御系の設計法を提案する。本手法では、制御系の安定性は *Youla* パラメトリゼーションにより確保され、また、制御対象に加わる外乱は基準コントローラにより抑制される。しかし、モデル化誤差が存在する場合には、制御系の安定性は保証されないため、モデル化誤差を考慮した設計法が必要である。そのため、*Youla* パラメトリゼーションの双対な考え方に基づく制御対象のクラスを考える。本手法のモデル予測制御系は、この制御対象のクラスとこれを安定化するコントローラのパラメトリゼーションにより構成される。これにより、モデル化誤差が存在する場合にも、制御系の安定性は確保される。モデル予測制御は、コントローラの内部信号を用いてモデル化誤差を同定しながらパラメトリゼーションのフリーパラメータを調整することにより行われる。本手法の特徴は、制御系の安定性が確保されることができるとなどを上げることができる。シミュレーションでは、 $Time = 2$  での制御対象の出力が40ステップで設定値1へ到達するようにモデル予測制御を行い、本手法の有効性を示した（図3参照）。

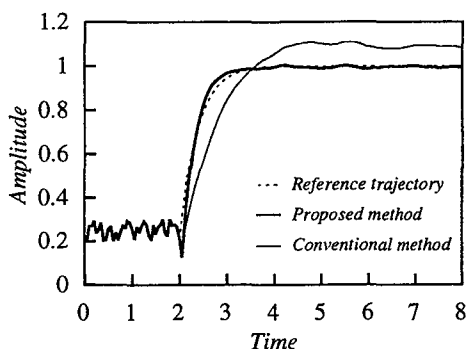


図3 出力の比較

#### 第4章 既約分解表現に基づく一般化予測制御系の設計

第3章の設計法では、制御対象の出力を変化する設定値に追従させるには、設定値の変化にあわせて目標軌道を計算し、パラメトリゼーションのフリーパラメータをリセットしなければならない。このような変化する設定値に対処する方法として一般化予測制御法が提案されている。一般化予測制御法とは、現在から未来のある時点までの有限時間を予測する区間とし、この区間の設定値と出力の予測値の誤差を評価関数で表し、これを最小とする操作量を決定し、最初の時点のみ制御を行う。次の時点では、この区間を1つ未来へ移動し操作量を決定する。以上の手順を繰り返す制御法である。しかし、この制御系の安定性は保証されていない。一方、第3章のモデル予測制御法では、1自由度制御系のパラメトリゼーションを用いて制御系設計を行ったが、制御系の安定化と目標軌道追従特性向上の2つの仕様を同時に満足するように制御系設計を行うには、2自由度制御系の方が適している。しかし、一般化予測制御系の安定性を確保する方法として、2自由度制御系のパラメトリゼーションを用いた設計法は提案されているが、モデル化誤差は考慮されていない。

そこで、本章では、モデル化誤差を考慮した2自由度制御系のパラメトリゼーションに基づく一般化予測制御系の設計法を提案する。制御系の安定性は、モデル化誤差をあらかじめ同定し、これ

をフィードバックコントローラで安定化することにより確保する。一般化予測制御は、フィードフォワードコントローラを用いて行う。本手法の特徴は、モデル化誤差を考慮した設計法であり、従来法では保証されない一般化予測制御系の安定性が確保されることである。シミュレーションでは、変化する設定値  $Y_s$  に対して本手法の有効性を示した（図4参照）。

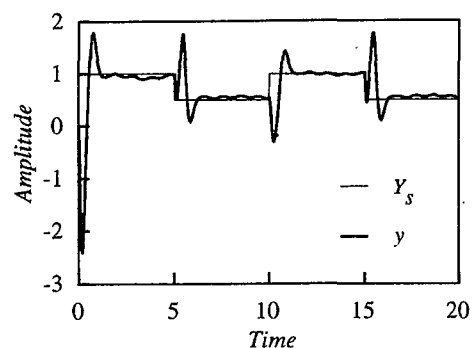


図4 本手法の出力

## 第5章 結 論

本論文では、既約分解表現に基づく学習制御および予測制御系の設計法を提案し、その有効性を示した。本論文で述べたように、制御系設計に既約分解表現を用いることにより、より見通しの良い制御系設計を行うことができる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

近年、制御系設計理論において、伝達関数行列の安定有理関数行列による既約分解表現が広く用いられている。この既約分解表現を用いると、*Youla* パラメトリゼーションにより制御対象を安定化する全てのコントローラのクラスを安定有理関数行列をフリーパラメータとして簡潔に表現することができ、制御系設計問題の数学的な取り扱いが容易になる。この既約分解表現は、 $H_\infty$  制御理論、数値的最適化に基づく制御系設計法やあるクラスの適応制御系の設計に利用されてきた。

一方、最近、学習制御法や予測制御法などの新しい制御方式が注目を集めている。このような制御方式に対しても、既約分解表現を用いることにより、より見通しの良い設計法を確立することが可能であると考えられる。

本論文は、既約分解表現に基づく学習制御系および予測制御系の設計に関する研究成果をまとめたものであり、全編5章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、既約分解表現に基づく閉ループ構成の学習制御系の設計法を提案している。この制御系は、*Youla* パラメトリゼーションに基づいて構成されており、基準コントローラとフリーパラメータから成る。学習制御は、このフリーパラメータを学習制御アルゴリズムにより調整して行われる。この設計法では、従来知られている設計法と異なり、制御対象に加わる外乱の影響をコントローラによって抑制することが可能であり、より現実的な学習制御を達成する。

第3章では、既約分解表現に基づくモデル予測制御系の設計法を提案している。モデル予測制御とは、制御対象の出力の未来値を予測し、これを利用して現在時点からの操作量を決定する制御則である。本手法の制御系は、モデル化誤差を考慮するため、基準コントローラによって安定化可能な制御対象のクラスとこのクラスを安定化する *Youla* パラメトリゼーションを用いて構成される。これにより、モデル化誤差が存在する場合にも、従来の方法では保証されない制御系の安定性を確保することが可能となる。これは、モデル予測制御に関する重要な知見である。

第4章では、モデル化誤差を考慮した2自由度制御系の既約分解表現に基づく一般化予測制御系の設計法を提案している。この手法では、あらかじめモデル化誤差を同定し、これをフィードバックコントローラにより安定化することで制御系の安定性が確保されている。その上で、フィードフォワードコントローラを一般化予測制御則により設計し、制御対象の出力を変化する設定値に追従させることが提案されている。この構成法は、モデル予測制御の難点を克服するものであり、その意義は極めて大きいと言える。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、既約分解表現に基づく学習制御系およびモデル化誤差を考慮した既約分解表現に基づく予測制御系の設計法について提案したもので、制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。